

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-204039

(43)Date of publication of application : 19.07.2002

(51)Int.Cl.

H01S 5/50
G02F 1/017
H01S 5/343

(21)Application number : 2000-401628

(71)Applicant : TOSHIBA CORP

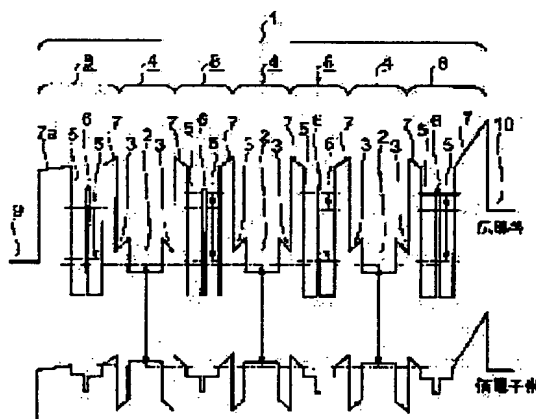
(22)Date of filing : 28.12.2000

(72)Inventor : SUZUKI NOBUO

(54) SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING ELEMENT, METHOD FOR MODULATING IT, AND SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING DEVICE**(57)Abstract:**

PROBLEM TO BE SOLVED: To enable to use a semiconductor light source capable of rapidly modulating in several GHz to several tens GHz (millimeter wave band).

SOLUTION: In a semiconductor light emitting element capable of rapidly modulating, a first quantum well layer 4 having an InGaAsP well layer 2 to be a light emitting element and an InGaAsP barrier layer 3 having a wider forbidden band width than that of the layer 2, and a second quantum well layer 8 in which two InGaAs well layers 5 and a thin distortion AlAs intermediate barrier layer 6 formed between the two layers 5 are interposed between AlAsSb barrier layers 7, are alternatively laminated to constitute a light emitting region 1. An n-type InGaAsP light guide layer 9 is laminated on a lower part of the region 1, and a p-type InGaAsP light guide layer 10 is laminated on an upper part of the region 1. The layer 8 has different inter-subband absorption wavelength from the light emitting wavelength in the layer 4, and the emitting light is modulated by injecting a modulation signal in the inter-subband absorption wavelength band.

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination] 28.12.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3505509

[Date of registration] 19.12.2003

[Number of appeal against examiner's decision]

of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許番号

特許第3505509号

(P3505509)

(45) 発行日 平成16年3月8日(2004.3.8)

(24) 登録日 平成15年12月19日(2003.12.19)

(51) Int.Cl.⁷ 識別記号

H 0 1 S 5/50 6 3 0

G 0 2 F 1/017 5 0 6

H 0 1 S 5/343

F I

H 0 1 S 5/50 6 3 0

G 0 2 F 1/017 5 0 6

H 0 1 S 5/343

請求項の数6(全11頁)

(21) 出願番号 特願2000-401628(P2000-401628)

(22) 出願日 平成12年12月28日(2000.12.28)

(65) 公開番号 特開2002-204039(P2002-204039A)

(43) 公開日 平成14年7月19日(2002.7.19)

審査請求日 平成12年12月28日(2000.12.28)

(出願人による申告) 国などの委託研究の成果に係る特許出願(平成12年度新エネルギー・産業技術総合開発機構「フェムト秒テクノロジーの研究開発」委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの)

(73) 特許権者 000003078

株式会社東芝

東京都港区芝浦一丁目1番1号

(72) 発明者 鈴木 信夫

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地

株式会社東芝研究開発センター内

(74) 代理人 100058479

弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

審査官 道祖土 新吾

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体発光素子と半導体発光装置及び半導体発光素子の変調方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】 発光層とすべき第1の半導体層を有する発光領域と、この発光領域を挟んで形成された第1の半導体層よりも禁制帯幅の広い第2及び第3の半導体層と、第1の半導体層に電子と正孔を電気的に注入して発光させる手段とを具備した半導体発光素子であって、第1の半導体層の近傍に少なくとも第4の半導体層と該第4の半導体層よりも禁制帯幅の狭い第5の半導体層からなる量子井戸層が形成されており、該量子井戸層は第1の半導体層における発光波長とは異なるサブバンド間吸収波長を有しており、このサブバンド間吸収波長の帯域内の変調信号光の入力により第1の半導体層の発光に寄与するキャリアの割合を変調することによって発光光を変調することを特徴とする半導体発光素子。

【請求項2】 発光層とすべき第1の半導体層を有する第

1の量子井戸層が複数層積層配置された発光領域と、この発光領域を挟んで形成された第1の半導体層よりも禁制帯幅の広い第2及び第3の半導体層と、第1の半導体層に電子と正孔を電気的に注入して発光させる手段とを具備した半導体発光素子であって、隣接する第1の量子井戸層間に少なくとも第4の半導体層と該第4の半導体層よりも禁制帯幅の狭い第5の半導体層からなる第2の量子井戸層がそれぞれ形成されており、第2の量子井戸層は第1の量子井戸層における発光波長とは異なるサブバンド間吸収波長を有しており、このサブバンド間吸収波長の帯域内の変調信号光の入力により第1の半導体層の発光に寄与するキャリアの割合を変調することによって発光光を変調することを特徴とする半導体発光素子。

【請求項3】 請求項1又は2に記載の半導体発光素子

と、この半導体発光素子に対し、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層のサブバンド間吸収波長の帯域内の変調信号を入力する手段とを具備してなり、前記変調光の入力により第1の半導体層の発光に寄与するキャリアの割合を変調することによって発光光を変調することを特徴とする半導体発光装置。

【請求項4】請求項1又は2に記載の半導体発光素子と、この半導体発光素子に対し、前記変調信号光と共に前記サブバンド間吸収波長の帯域内にあって該変調信号光と所定の周波数だけ中心周波数が異なるCW光を注入する手段とを具備してなり、前記変調信号光と前記CW光のビートで第1の半導体層内の発光に寄与するキャリアの割合を変調することにより発光光を変調することと特徴とする半導体発光装置。

【請求項5】請求項1又は2に記載の半導体発光素子を駆動する際に、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層のサブバンド間吸収波長帯域内の変調信号光を注入して第1の半導体層の発光に寄与するキャリアの割合を変調することにより、前記半導体発光素子における発光光を変調することを特徴とする半導体発光素子の変調方法。

【請求項6】請求項1又は2に記載の半導体発光素子に、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層のサブバンド間吸収波長の帯域内にある変調信号光と該変調信号光と所定の周波数だけ中心周波数が異なるCW光とを注入し、この変調信号光とCW光のビートで、第1の半導体層内の発光に寄与するキャリアの割合を変調することにより、前記半導体発光素子における発光光を変調することを特徴とする半導体発光素子の変調方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、高速変調された入力光により入力光と異なる波長の出力光が高速変調される半導体発光素子、この半導体発光素子を用いた半導体発光装置、更にはこの半導体発光素子を高速に変調するための変調方法に関する。

【0002】

【従来の技術】光技術の急激な進展により、大容量光伝送技術が基幹ネットワークや光LANだけでなく、光アクセス系、マイクロ波ミリ波フォトニクス、ホームネットワーク等にも応用されようとしている。これらのシステムでは、基幹系より遙かにコストが重要であり、高性能かつ低価格の光源が必要である。さらに、ホームネットワーク等への応用では、従来の光通信で使われていた近赤外域だけでなく、可視光領域の利用も進むものと考えられており、可視光領域でも近赤外域並に高速変調可能な光源が必要になってきている。

【0003】しかし、従来の半導体光源の動作速度は、電氣的な容量や抵抗等により制限されており、光通信波長では20GHz程度、可視波長域では数十MHzから

数GHz程度が限界であった。以下、マイクロ波フォトニクスとホームネットワークの例について、従来の技術の課題について述べる。

【0004】現在、モバイルインターネットの急激な普及が進んでおり、将来、高速無線アクセス、超高速無線LAN、無線ホームリンク、ITSなどで、22GHz帯、26GHz帯、38GHz帯、60GHz帯などのミリ波を利用した帯域拡大が必要になると考えられている。ミリ波の届く範囲が狭いという局在性も、加入者数を増やす上で重要な要素となる。ミリ波の伝送には、長距離伝送しても減衰が小さく多重化により大容量伝送が可能な、光ファイバを用いたROF(Radio OnFiber)技術の導入が必須と考えられており、その実現には低価格のミリ波送信用アナログ光源が必要とされている。

【0005】半導体レーザは、キャリア注入レベルを上げるに従って緩和振動周波数が増大するので、3dB変調帯域も増大する。しかし、光パワーが強くなるに従って利得飽和が生じるため、注入レベルが高すぎると逆に帯域は減少する。光通信波長帯の半導体レーザの利得飽和による限界帯域は、通常数十GHzである。しかし大部分の場合、素子の3dB帯域はむしろCR時定数により制限されている。活性層(半導体レーザの発光層)が量子井戸の場合、活性層への光閉じ込めを強めるために設けられた光導波層やSCH層にキャリアが蓄積される、いわゆる「キャリア輸送効果」によっても、変調帯域が制限されることがある。

【0006】これらの要因により通信用半導体レーザの3dB帯域は、数GHzから20数GHzの範囲に制限されている。他の波長の半導体レーザよりは高速動作可能であるが、それでもミリ波帯(22GHz以上)での光変調には帯域が不十分である。このため、ミリ波帯では半導体電界吸収(EA)型光変調器や、LiNbO₃等のマッハツェンダ干渉計(MZ)型光変調器を用いた実験が進められている。しかし、ミリ波帯(22GHz~60GHz)で動作する高速光変調器モジュールは、高周波駆動回路や接続部の実装が困難であり、高価で量産性が低く、とても実用的と言える状況ではない。

【0007】一方、ホームリンクや光LANでは、プラスチック光ファイバ(POF)を利用した低価格光リンクへの期待が高まっている。POFの低損失波長帯としては、650nm帯、570nm帯、500nm帯がある。比較的変調速度が低い場合は光源として発光ダイオード(LED)が、変調速度が高い場合には半導体レーザが使われる。

【0008】可視領域の半導体レーザは、電極抵抗が大きかったり、ドナーやアクセプターの準位が深かったり、キャリアが越えるべきヘテロ障壁が大きかったりして、近赤外域の半導体レーザと比べて直列抵抗が大きくなる傾向がある。また、構造上、活性層(発光層)ストライプ幅やメサ幅が広く、不連続の大きなヘテロ接合界

10

20

30

40

50

面にパイルアップするキャリアの数も多いので、近赤外域の半導体レーザより並列容量が大きくなる傾向がある。従って、高注入で緩和周波数を上げたとしても、給電系のCR時定数による制限のため、数GHz以上の高速変調を行うことは困難であった。

【0009】いずれにせよ、高周波信号や高速信号の駆動回路や実装はコスト高の原因となる。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】このように、従来の半導体光源の動作速度は、電気的なCR時定数、キャリア輸送効果などの現象により制限されており、一般的な構造では、光通信波長で20GHz程度、可視波長域で数十MHzから数GHz程度が限界であった。また、光通信波長においては、数十GHzのミリ波帯で動作可能な光変調器を作製することは可能であったが、量産性やコストの点で実用的ではなかった。

【0011】本発明は、上記の課題を鑑みて考案されたものであり、その目的とするところは、数GHzから数十GHz（ミリ波帯）の高速変調が可能な半導体光源として用いることのできる半導体発光素子、この半導体素子を用いた半導体発光装置、更にはこの半導体発光素子を変調するための変調方法を提供することにある。

【0012】

【課題を解決するための手段】（構成）上記課題を解決するために本発明は次のような構成を採用している。即ち本発明は、発光層とすべき第1の半導体層を有する発光領域と、この発光領域を挟んで形成された第1の半導体層よりも禁制帯幅の広い第2及び第3の半導体層と、第1の半導体層に電子と正孔を電気的に注入して発光させる手段とを具備した半導体発光素子であって、第1の半導体層の近傍に少なくとも第4の半導体層と該第4の半導体層よりも禁制帯幅の狭い第5の半導体層からなる量子井戸層が形成されており、該量子井戸層は第1の半導体層における発光波長とは異なるサブバンド間吸収波長を有していることを特徴とする半導体発光素子である。

【0013】上記半導体発光素子の好ましい実施態様としては、以下のようなものがある。量子井戸層と第2及び第3の半導体層の間に、サブバンド間吸収により励起サブバンドに励起されたキャリアが第2及び第3の半導体層（クラッド層、光導波層など）にあふれ出すのを防止するための手段が設けられている。その具体例には、該当するキャリアに対するヘテロ障壁、超格子構造の多重量子障壁層などがある。

【0014】また本発明は、発光層とすべき第1の半導体層を有する第1の量子井戸層が複数層積層配置された発光領域と、この発光領域を挟んで形成された第1の半導体層よりも禁制帯幅の広い第2及び第3の半導体層と、第1の半導体層に電子と正孔を電気的に注入して発光させる手段とを具備した半導体発光素子であって、隣

接する第1の量子井戸層間に少なくとも第4の半導体層と該第4の半導体層よりも禁制帯幅の狭い第5の半導体層からなる第2の量子井戸層がそれぞれ形成されており、第2の量子井戸層は第1の量子井戸層における発光波長とは異なるサブバンド間吸収波長を有していることを特徴とする半導体発光素子である。

【0015】上記半導体発光素子の好ましい実施態様としては、以下のようなものがある。第2の量子井戸層と第2及び第3の半導体層の間に、サブバンド間吸収により励起サブバンドに励起されたキャリアが第2及び第3の半導体層（クラッド層、光導波層など）にあふれ出すのを防止するための手段が設けられている。その具体例には、該当するキャリアに対するヘテロ障壁、超格子構造の多重量子障壁層などがある。

【0016】また本発明は、上記構成の半導体発光素子に対し、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層のサブバンド間吸収波長の帯域内の変調信号光を注入する手段を設け、前記変調光の入力により第1の半導体層の発光に寄与するキャリアの割合を変調することによって発光光を変調することを特徴とする半導体発光装置である。

【0017】上記半導体発光装置の好ましい実施態様としては、以下のようなものがある。

【0018】（1）前記半導体発光素子と、サブバンド間吸収波長の光を発生する光源とが、同一基体上に集積化されている。この集積化は、同一基体上にモノリシックに集積化されていてもよいし、別の基体上に形成された素子がハイブリッドに集積化されていてもよい。

【0019】（2）半導体発光素子の外部から第2の量子井戸層にサブバンド間吸収波長の光を結合する手段が設けられている。光を結合するための手段の具体例としては、劈開やエッチングで形成された光導波構造の端面、入射光に対する低反射率コーティング、光ファイバ、レンズ、光フィルタ、光カプラ、合波器、偏光ビームスプリッター、光サーキュレータ、光アイソレータ、光導波路、回折格子などがある。

【0020】また本発明は、上記構成の半導体発光素子に対し、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層のサブバンド間吸収波長の帯域内にある変調信号光と該変調信号光と所定の周波数だけ中心周波数が異なるCW光を注入する手段を設け、前記変調信号光と前記CW光のビートで第1の半導体層内の発光に寄与するキャリアの割合を変調することにより発光光を変調すること特徴とする半導体発光装置である。

【0021】上記半導体発光装置の好ましい実施態様としては、以下のようなものがある。

（1）前記半導体発光素子とサブバンド間吸収波長の光を発生する光源とが、同一基体上に集積化されている。この集積化は、同一基体上にモノリシックに集積化されていてもよいし、別の基体上に形成された素子がハイブ

リッドに集積化されていてもよい。

【0022】(2) 半導体発光素子の外部から第2の量子井戸層にサブバンド間吸収波長の光を結合する手段が設けられている。光を結合するための手段の具体例としては、劈開やエッチングで形成された光導波構造の端面、入射光に対する低反射率コーティング、光ファイバ、レンズ、光フィルタ、光カプラ、合波器、偏光ビームスプリッター、光サーキュレータ、光アイソレータ、光導波路、回折格子などがある。

【0023】また本発明は、上記構成の半導体発光素子を駆動する際に発光光を変調するための半導体発光素子の変調方法において、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層のサブバンド間吸収波長帯域内の変調信号光を注入して第1の半導体層の発光に寄与するキャリアの割合を変調することにより、前記半導体発光素子における発光光を変調することを特徴とする変調方法である。

【0024】上記変調方法の好ましい実施態様としては、以下のようなものがある。

(1) 変調信号光がアナログ的に変調されていること。

(2) 入力される変調信号光のパワーが、サブバンド間吸収を部分的に飽和させる程度に強いこと。

【0025】また本発明は、上記構成の半導体発光素子を駆動する際に発光光を変調するための半導体発光素子の変調方法において、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層のサブバンド間吸収波長の帯域内にある変調信号光と該変調信号光と所定の周波数だけ中心周波数が異なるCW光とを注入し、この変調信号光とCW光のビートで、第1の半導体層内の発光に寄与するキャリアの割合を変調することにより、前記半導体発光素子における発光光を変調することを特徴とする変調方法である。

【0026】上記変調方法の好ましい実施態様としては、以下のようなものがある。

(1) 変調信号光がアナログ的に変調されていること。

(2) 注入されるCW光のパワーがサブバンド間吸収を部分的に飽和させる程度に強く、かつ変調信号光のパワーがこのCW光より十分に(最低二桁)小さいこと。

【0027】(作用) 本発明の半導体発光素子が半導体レーザである場合、従来の半導体発光素子同様、CW電流で第1の半導体層に電子と正孔を蓄積して反転分布を形成することで、誘導放出によるレーザ発振を生じる。レーザ発振状態にある活性層内の総キャリア密度は殆ど変化せず、発振しきい状態より過剰に注入されたキャリア(電子と正孔の対)の数にほぼ相当する数のフォトンが出力される。

【0028】この状態で、第4及び第5の半導体層を有する量子井戸層にサブバンド間吸収波長帯域内の信号光を注入すると、電子又は正孔のサブバンド間吸収により第5の半導体層(井戸層)のサブバンド間のキャリア分布が変調され、その結果、井戸層の基底サブバンドと平衡している第1の半導体層の発光に寄与するキャリアの

割合も変調される。変調効率は、入力信号光のパワーがサブバンド間吸収を部分的に飽和させる程度の場合に、最も高くなる。

【0029】このとき、下の基底サブバンドから上の励起サブバンドに励起されたキャリアがクラッド層ないし光導波層(第2及び第3の半導体層)にあふれ出なければ、活性層内のキャリアの総数は殆ど変化しないから、この変調はキャリア寿命にも、CR時定数にも、キャリア輸送効果にも殆ど影響されない。

【0030】サブバンド間緩和時間はバンド間の緩和時間(キャリア寿命)と比べて3桁程度高速であり、時定数は1ps前後である。特に半導体量子井戸層が窒化物半導体からなる場合は、時定数が数百fsオーダーとなり、極めて高速の応答が実現できる。サブバンド間キャリア分布変調の遮断周波数 f_c は、おおむね $1/(\text{緩和時間} \times 2\pi)$ で表されるから、緩和時間が2psの場合で80GHz、緩和時間が200fsの場合で800GHzと広帯域である。

【0031】キャリアのトンネリング結合等を適切に設計すれば、第1の半導体層と第5の半導体層の間でのキャリアの移動速度を数ps、あるいはそれ以下にできるので、キャリアの移動にかかる時間を考慮しても、数十GHzの変調が可能である。

【0032】レーザ構造の工夫とバイアス電流の適切な設定により、緩和振動周波数も数十GHzにできる。但し、しきい値近くまで振り込んだ場合には緩和振動周波数が大きく低下するので、本発明は、しきい値以下かしきい値近傍までデジタル的に変調を行う場合よりも、比較的高バイアス条件でアナログ変調を行う場合に効果が大きい。

【0033】サブバンド間吸収帯域内の二つの波長で光が入力された場合、この二つの入力光のビート周波数がサブバンド間吸収による遮断周波数(数十GHz)と同程度以下であれば、第1の半導体層の発光に寄与するキャリア数がこのビート周波数で変調される。従って、一方の入力光がCW光で、もう一方の入力光が数百MHzで変調されている場合、ミリ波帯の中間周波数(ビート周波数)で変調された光が出力される。

【0034】このとき、CW光のパワーがサブバンド間吸収を部分的に飽和させる程度に強く、かつ変調信号光のパワーがこのCW光より十分に小さい場合にのみ、高効率で線形性の良い変調が可能となる。変調信号光のパワーが強すぎると、線形性が損なわれ、高調波成分が増大する。また、出力光のキャリア成分も変調信号光によるベースバンド変調でスペクトルが広がってしまう。

【0035】かくして本発明によれば、電気的な変調限界を超える超高速変調が可能な半導体発光素子を実現することができ、数GHz帯からミリ波帯で動作する半導体発光素子が実現される。変調により出射光のパワーが変化するが、同時にその発振周波数や位相も変化するの

で、本発明は強度変調のみならず、周波数変調や位相変調に応用することもできる。

【0036】なお、本発明を可視半導体レーザのようなCR制限等で電気的には1GHz以下の変調しかできないような半導体発光素子の高速化に適用する場合においては、第1の半導体層と第5の半導体層の間のキャリア平衡による周波数制限や緩和振動周波数をそれほど高める必要はなく、数GHzの応答があれば十分である。

【0037】本発明は、増幅された誘導放出光(ASE)を出力する半導体発光素子、発光ダイオード(LED)等にも適用することが可能である。この場合、活性層のキャリア密度をクランプする機構は働かない。特に、LEDではキャリア寿命の影響を受けることになる。しかし、キャリア寿命が短く、電気的なCR時定数やキャリア輸送効果が応答速度の支配的な制限要因になっている場合には、本発明により応答速度を格段に向上させることができる。

【0038】

【発明の実施の形態】以下、本発明の詳細を図示の実施形態によって説明する。

【0039】(第1の実施形態)図1は、本発明の第1の実施形態に係わる半導体発光素子(分布帰還形(DFB)半導体レーザ)の発光領域1付近のバンド構造を模式的に示す図である。なお、説明のために見やすく描いているため、厚さやエネルギーのスケール、バンドの曲がり具合等は正確でない。

【0040】この発光領域(活性層)1は、InGaAsP井戸層2(第1の半導体層)とこの井戸層2より禁制帯幅の広いInGaAsP障壁層3からなる第1の量子井戸層4と、二つのInGaAsP井戸層(第5の半導体層)5とその間に形成された薄いAlAs中間障壁層6がAlAsSb障壁層(第4の半導体層)7に挟まれてなる結合量子井戸層(第2の量子井戸層)8とが、交互に積層されてなる。この発光領域1の下部にはn型InGaAsP光導波層(第2の半導体層)9が、上部にはp型InGaAsP光導波層(第3の半導体層)10が積層されている。

【0041】AlAsSb障壁層7のうち最も外側の層7a、7bは、他の障壁層部分よりも厚くなっており、励起サブバンドの電子がクラッド層へあふれ出すのを抑制している。なお、図1ではInGaAsP井戸層5の正孔に対するポテンシャル(価電子帯)がAlAsSb障壁層6の価電子帯より高くなる場合(タイプIIの量子井戸)について示したが、この価電子帯のエネルギーの高低は逆転していてもよい(タイプIの量子井戸)。

【0042】InGaAsP井戸層2とのトンネリング結合がない場合、各結合量子井戸層8の伝導帯には二つずつ近接した計四つのサブバンドが形成されている。一番低エネルギーの基底サブバンドから一番高エネルギーのサブバンドまでのエネルギー差は約0.8eVであ

り、波長1.55μm付近でサブバンド間吸収を生じる。このような構造の結合量子井戸で1.55μm帯のサブバンド間吸収が実現できることは、文献(例えば、A. Neogi, et al., IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 6, pp. 632-634)に述べられている。結合量子井戸層8のバンド間吸収は、井戸層を薄くして吸収端波長を1.2μm以下にすれば、ここで考えている波長1.3μmと1.55μmの光に影響しない。

【0043】各InGaAsP井戸層2の伝導帯の最低サブバンドと隣接する結合量子井戸層8の低い方の二つのサブバンドは、ほぼ同じエネルギーになっており、トンネリングにより結合して複数の準位に分裂している。しかし、これらの準位のエネルギーは近接しているので、以下の説明では、これらの準位をまとめて一つのミニバンドとして扱うことにする。

【0044】図2は、このDFB半導体レーザの発光方向に沿った断面模式図である。n型InGaAsP光導波層9の下部にはn型InPクラッド層11とn型InP基板12があり、n型InP基板12の下部にはn型オーミック電極13が形成されている。n型InGaAsP光導波層9とn型InPクラッド層11との界面には、波長1.3μm帯で単一モード発振させるための回折格子14が形成されている。また、p型InGaAsP光導波層10の上にはp型InPクラッド層15とp型InGaAsPコンタクト層16が積層されており、その上部にはp型オーミック電極17が形成されている。

【0045】回折格子14の中央部付近には、四分の一の波長位相シフト部18が形成されている。また、両端面には低反射コート膜19が形成されている。電極13、17には電源回路が接続されており、InGaAsP井戸層2は電流注入により波長1.3μm付近に利得を生じ、回折格子14による共振効果で単一モード発振する。

【0046】図には示されていないが、n型InPクラッド層11、n型InGaAsP光導波層9、発光領域1、p型InGaAsP光導波層10、p型InPクラッド層15、p型InGaAsPコンタクト層16はストライプ状に加工され、基板側からn型InP層、p型InP層、n型InP層、p型InP層により埋め込まれており、ストライプ状の発光領域1に電流を集中できるようにになっている。

【0047】図3はこの第1の実施形態に係わるDFB半導体レーザを用いたミリ波光源の概略構成を示す図、図4はその中の(a)点、(b)点、(c)点におけるスペクトルを模式的に示す図である。

【0048】図1及び図2に示す構造のDFB半導体レーザ20は、サブマウントを介してヒートシンク上に搭載されており、光アイソレータ21、光フィルタ22、入射光と出射光を分離するための偏波ビームスプリッタ

10

20

30

40

50

ー(PBS)23、モニタ受光素子24、温度センサーやペルチェ素子からなる温度制御系25、入射光や出射光を光ファイバに結合するための光結合系やファイバ・ピグ・テール(図示せず)などと共に、レーザ・モジュール26に格納されている。このレーザ・モジュール26には、DFB半導体レーザ20の駆動電流や温度を制御するための制御回路27が接続されている。

【0049】また、このレーザ・モジュール26には、光ファイバ(図示せず)、合波器28を介して、二個の1.55 μ m帯のDFBレーザ29、30が接続されている。DFBレーザ29には、多重化されたRFアナログ信号(数十MHz~数百MHz)でDFBレーザを駆動するための信号多重化・駆動系31が接続されている。また、二つのDFBレーザ29、30には、モニタ受光素子24で得られるビート周波数とリファレンス周波数の差を誤差信号として、DFBレーザ29、30からの出力光の周波数差を一定に保つ波長制御系32も接続されている。

【0050】DFBレーザ29は、信号多重化・駆動系31によりRF信号で変調され、波長1.55 μ m帯で中心周波数 ν_1 の変調信号光を出力する。一方、もう一つのDFBレーザ30は、 ν_1 から60GHz離れたCW光を出力する。これら二つのDFBレーザ29、30から出力された光は、合波器28で合波され、偏波ビームスプリッター23を介してTMモードで本発明の第1の実施形態に係わるDFB半導体レーザ20に入力される。

【0051】合波器28で合波されたスペクトルを図4(a)に示す。DFBレーザ30からのCW光パワーは、DFB半導体レーザ20の結合量子井戸層8におけるサブバンド間吸収を部分的に飽和させるように設定されているものとする。また、DFBレーザ29からの変調信号光パワーは、DFBレーザ30の出力光パワーより最低でも二桁小さく設定してあるものとする。

【0052】第1の実施形態に係わるDFB半導体レーザ20は、緩和振動周波数が60GHz程度になるようにバイアスされており、1.3 μ m帯において中心周波数 ν_2 のTE基本モードで単一モード発振しているものとする。この発振波長は結合量子井戸層8のサブバンド吸収の帯域外であり、しかもサブバンド間吸収はTMモードに対してのみ生じるから、発振光に対する過剰損失は殆ど無視できるレベルである。

【0053】このDFB半導体レーザ20に入射された1.55 μ m帯のTMモード光は、結合量子井戸層8のサブバンド間吸収で減衰を受けながら、発光領域1と光導波路9、10により導波される。このサブバンド間吸収により、発光領域1に注入された電子の一部が上のサブバンドに励起され、その結果、InGaAsP井戸層2の発光に寄与できる電子の割合が変調される。

【0054】しきい値以下まで振り込まなければ、発光

領域1内部の総キャリア密度は殆ど変化しないから、この変調は、CR時定数にも、キャリア輸送効果にも殆ど影響されない。サブバンド間緩和時間やトンネル時間はpsオーダーなので、二つの入射光のビート周波数である60GHzに追従できる。従って、波長1.3 μ m帯の出力光強度が60GHzのビート周波数で変調されることになる。変調信号光のパワーを小さく、CW入力光のパワーを大きく設定してあるので、高効率で線形性の良い変調が可能である。

【0055】出力された1.3 μ m帯(中心周波数 ν_2)の光は、光アイソレータ21と光フィルタ22を通して出力される。光フィルタ22は変調側帯波の一方をカットし、伝送用光ファイバの分散による二つのサイドバンドの干渉を防止する。光フィルタ22の前後のスペクトルをそれぞれ図4(b)、図4(c)に示す。

【0056】このように本実施形態によれば、発光に寄与する第1の量子井戸層4と変調に寄与する第2の量子井戸層8とを交互に積層して、発光光を高速変調可能にした半導体発光素子を用いることにより、ミリ波帯で変調可能な半導体光源が実現される。ミリ波帯の大電力駆動回路や光変調器やシールドが不要なので、従来のミリ波帯の光源と比べて低価格にできる。

【0057】なお、本発明は上記の実施形態に限定されるものではなく、発明の要旨を逸脱しない範囲で様々な変形が可能である。

【0058】例えば、偏光スプリッターをDFB半導体レーザ20とモニタ受光素子24の間に配置する代わりに、DFB半導体レーザ20と光アイソレータ21の間に配置して、1.3 μ m発振光の出射側から1.55 μ m帯の光を注入すれば、DFB半導体レーザ20の光結合の調整が簡略化できる。

【0059】図5に示すように、1.55 μ m帯のDFBレーザ41、42やモニタ受光素子43と同一基体40上に集積化されていてもよい。この場合、1.55 μ m帯の入射光は光導波路44により1.3 μ m帯のDFB半導体レーザ(発明の半導体発光素子)45に導かれる。その途中には、TEモードで発振した光をTMモードに変換するための二分の一波長板46と、1.55 μ m帯の光は透過するが1.3 μ m帯の光は反射する波長フィルタ47が挿入されており、DFB半導体レーザ45からの1.3 μ mの光はモニタ受光素子43へ導かれる。図には明示していないが、駆動回路や制御回路も同一基体40上に集積化可能である。

【0060】また、本実施形態では、1.55 μ m帯のDFBレーザが二個使用されていたが、一つのDFBレーザの出力を分岐し、一方にはRF変調をかけ、他方は60GHzだけ周波数をシフトし、再び合波するという使い方もできる。また、変調信号を発生する光源にのみDFBレーザを使用し、CW光を発生する光源にはファイバレーザを使用してもよい。このCW光源は、複数の

半導体発光素子に共通の光源として、出力を増幅、分岐して使うこともできる。中間周波数も60GHzに限定されるものではない。ビートが干渉し合わないよう設定すれば、複数のRF周波数帯を多重化して利用することも可能である。

【0061】また、本実施形態では、全てのInGaAsP井戸層（発光層）2が結合量子井戸層（サブバンド間吸収層）8とトンネリング結合していたが、それぞれの井戸層（発光層）を独立させ、各井戸層に複数のサブバンド吸収層を結合させてもよい。波長についても、1.55μmと1.3μmの組み合わせに限定されるものではない、材料や構造も本実施形態に限定されるものではない。

【0062】（第2の実施形態）図6は、本発明の第2の実施形態に係わる半導体発光素子（青色半導体レーザ）の活性層付近のバンド構造を模式的に示す図である。なお、窒化物半導体ヘテロ構造中にはピエゾ電気効果等に起因する大きなビルトイン電界が存在するが、説明を簡単にするため、この図ではpn接合の拡散電位も含め、電界を無視して描いている。また、図1の場合と同様に、スケールも変形して描いている。

【0063】ここに積層されている半導体層は、図の左の方から、n型GaN井戸層51とAl_{0.2}Ga_{0.8}N障壁層52からなるn型超格子クラッド層（第2の半導体層）53、Al_{0.85}Ga_{0.15}N障壁層54、n型GaN層（第5の半導体層）55とAl_{0.85}Ga_{0.15}N層（第4の半導体層）56からなるサブバンド間吸収量子井戸層57、n型GaN層58、In_{0.18}Ga_{0.82}N井戸層（第1の半導体層）59とIn_{0.05}Ga_{0.95}N障壁層60からなる活性層（発光層）61、p型GaN層62、Al_{0.2}Ga_{0.8}N障壁層63、p型GaN井戸層64とAl_{0.2}Ga_{0.8}N障壁層65からなるp型超格子クラッド層（第3の半導体層）66である。

【0064】サブバンド間吸収量子井戸層57の伝導帯には、基底サブバンド67と励起サブバンド68の二つのサブバンドが形成されており、その吸収波長は1.55μmである。なお、ここでは、複数の井戸のサブバンドがトンネリング結合して形成される準位群は、まとめて一つのサブバンドとして扱うこととする。AlGaIn/GaN量子井戸で波長1.55μm帯のサブバンド間吸収が実現できることは、文献（例えば、C. Gmachl et al., Applied Physics Letters, Vol. 77, No. 23, pp. 3722-3724）に示されている。

【0065】図7は、この青色半導体レーザの断面構造を模式的に示す図である。上記の積層構造53～66は、サファイア基板71の上に積層されたn型GaN導電層72の上に形成されている。p型超格子クラッド層66の上部にはp型GaN導電層73が積層されており、その上には、ストライプ状の開口部74を有するn型GaN電流狭窄層75と、p型GaNコンタクト層7

6が積層されている。n型GaN導電層72とp型GaNコンタクト層76の上には、それぞれオーミック電極77、78が形成されている。n型超格子クラッド層53から上の層構造はストライプ状のメサ79に加工されており、劈開により形成された端面によりレーザ共振器が形成されている。端面の一方には、波長1.55μmの光は透過するが、波長0.41μm近傍の光は反射する誘電体多層膜（図示せず）が形成されている。

【0066】電極77、79を介してこの半導体レーザに電流を注入すると、活性層61の伝導帯と価電子帯に形成された量子準位69、70の間で反転分布ができ、波長0.41μm付近でレーザ発振が起こる。活性層61において、電流が開口部74の直下付近に集中することにより、発光モードが制御される。窒化物半導体のようなワイドギャップ半導体は抵抗率が高いのに加えて、ヘテロ界面での電位降下も大きいので、素子の直列抵抗が高くなってしまふ。また、電極抵抗を下げるためにメサ79の幅を広くする必要があるため、並列容量も小さくしにくい。それ故、この半導体レーザの電氣的な変調帯域は、CR制限により100MHzオーダーに制限されている。

【0067】この半導体レーザにCW電流を流して発振させた状態で、前記誘電体多層膜の形成された端面から波長1.55μmの変調信号光を注入する。その光パワーはサブバンド間吸収量子井戸層57のキャリアのエネルギー分布を大きく変えるに十分なパワーであり、偏波は井戸層に垂直な電界成分を有するものとする。入射信号光は、5GHzで変調されているものとする。このとき、In_{0.18}Ga_{0.82}N井戸層（第1の半導体層）59への電子の供給が変調信号光により変調されるため、0.41μmの発振光も5GHzで変調されることになる。

【0068】このように、本発明を適用することにより、電氣的には100MHz程度の周波数でしか変調できない半導体レーザを数GHzで変調することが可能になる。また、ワイドギャップ半導体レーザを直接変調する代わりに動作電圧が低い近赤外波長の半導体レーザを変調するので、変調回路の電圧を下げるができるという効果もある。光通信で開発された技術を流用できるので、コストも低減できる。

【0069】この青色半導体レーザは、光ディスクの超高速書き込みヘッドに応用できる。即ち、光ディスクを高速回転させると共に、1.55μm帯で帯域が数GHzのDFBレーザを介して高出力青色半導体レーザの発振光を高速変調することで、従来技術と比べて遙かに速くデータを書き込むことが可能になる。

【0070】本発明は、他にも色々な応用が可能である。例えば、光ディスク用読み出し用半導体レーザを安定なマルチモードで発振させて低雑音化する方法に、高周波重畳という技術があるが、CR時定数の大きな青色

10

20

30

40

50

半導体レーザに電氣的に高周波重畳をかけることは困難であった。本実施形態の青色半導体レーザに、その緩和振動周波数に相当する周波数でRF変調された近赤外光を注入することで、高周波重畳と同じ効果を得ることができる。

【0071】緩和振動周波数がそれほど高くできない場合などでは、二つの入力光のビートをレーザの縦モードに共振させても同様の動作が可能である。即ち、本発明の第2の実施形態に係わる青色半導体レーザの共振器縦モード間隔を Δf とすると、周波数差が Δf にほぼ等しい二つの波長で安定に発振している1.55 μm 帯半導体レーザの出力を結合させることで、安定な高周波重畳をかけることができる。或いは、外部共振器を利用して Δf を実用的な周波数領域に下げれば、ビートを使わなくてもRF変調が可能である。

【0072】また、素子構造、材料、波長等も、上記の第2の実施形態に限定されるものではない。例えば、BeTe/ZnSe量子井戸層のサブバンド間吸収(1.55 μm)とZnCdMgSSe系量子井戸層の青緑色発光の組み合わせなども可能である。

【0073】(第3の実施形態)図8は、本発明の第3の実施形態に係わる半導体発光素子(赤色フォトン・リサイクリングLED)の断面構造を模式的に示す図である。

【0074】本実施形態のLEDは、n型GaAsからなる10°オフ基板80上に順次成長された、反射率98%のn型Al_{0.95}Ga_{0.05}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}AsからなるDBR層81、n型Al_{0.95}Ga_{0.05}As層82、その上に同心円状形成された波長1.55 μm 帯の光に対する二次の回折格子83、この回折格子83を平坦に埋め込むn型Al_{0.5}Ga_{0.5}As層84、n型Al_{0.35}Ga_{0.15}In_{0.5}P層の間に薄いn型AlAsSb/GaInNAs量子井戸層(第2の量子井戸層)が多層形成されているn型クラッド層85、アンドープGa_{0.5}In_{0.5}P井戸層とアンドープAl_{0.25}Ga_{0.25}In_{0.5}P障壁層からなる量子井戸発光層(第1の量子井戸層)86、p型Al_{0.95}Ga_{0.05}As層87、p型Al_{0.35}Ga_{0.15}In_{0.5}Pクラッド層88、p型GaAsコンタクト層89からなる。

【0075】n型クラッド層85の内部に形成された歪AlAsSb/GaInNAs井戸層には二つのサブバンドが形成されており、そのサブバンド間吸収波長は1.6 μm である。

【0076】この層構造は、図のように二段の同心円のメサ状に加工されており、p型Al_{0.95}Ga_{0.05}As層87の外縁部は水蒸気中でのアニールにより選択酸化されて、絶縁・アパーチャ領域90となっている。また、p型GaAsコンタクト層89は中心部がエッチングにより除去されており、誘電体反射膜ミラー91が形成されている。残されたリング状のp型GaAsコンタクト

層89の上部にはp型オーミック電極92が、基板80の裏側のLEDメサ直下を除く部分にはn型オーミック電極93が形成されている。

【0077】このLEDに電流を注入すると、発光層86で電子と正孔が再結合し、0.65 μm 帯の発光を生じる。この光は反射率の大きなDBR層81と反射率が中程度の誘電体多層膜ミラー91により閉じ込められるので、フォトン・リサイクリングにより強い発光が生じる。赤色面発光レーザ(VCSEL)は温度特性が悪いことが問題となっているが、本実施形態の半導体発光素子はLEDなので、温度変動に強い。

【0078】基板80の裏の電極93のない窓部から、波長1.55 μm 帯の変調信号光を入射する。DBR層81は、波長0.65 μm の光は反射するが、この1.55 μm 帯の入射光は透過するように設定されている。波長1.55 μm 帯の変調信号光は二次の回折格子83により成長層と平行な方向に回折する。この回折成分は、井戸に垂直な電界成分を持つから、n型クラッド層85の内部に形成された歪AlAsSb/GaInNAs量子井戸層のサブバンド間遷移で吸収される。従って、n型クラッド層85から発光層86へのキャリア注入が変調され、LEDの出力が変調される。サブバンド間吸収に係わる量子井戸層と発光層の間の距離が離れているので、サブバンド間吸収に係わる量子井戸層と発光層の間の電子の平衡時間は第1の実施形態の場合と比べて長くなるが、数GHzの変調には十分に応答する。

【0079】この変調は、n型DBR層81やp型クラッド層88の大きな直列抵抗や、薄い酸化層90の容量の影響を受けないので、電氣的に変調するのと比べて遙かに高速である。従って、VCSEL並みのGHzオーダーの変調帯域を有し、温度特性にも優れた半導体発光素子が実現される。変調電圧も低く抑えることができる。このLED94は、0.65 μm 帯POF伝送用に用いることができる。

【0080】なお、本実施形態のLED94は、図9に示すように、1.55 μm 帯で発光する面発光レーザ(VCSEL)95とGaAs基板80の表裏で集積化してもよい。1.55 μm 帯のVCSELの作製法として、GaAs基板80上に積層した屈折率差の大きなAlGaAs/GaAsからなるDBR層と、InP基板上に作製したInGaAsP系積層構造とを、直接張り合わせ技術で一体化して作製する技術が知られているが、このような技術を本発明と組み合わせることも可能である。

【0081】本発明は、以上述べた三つの実施形態以外にも、発明の趣旨を逸脱しない範囲で様々な変形、応用が可能である。

【0082】

【発明の効果】以上詳述したように本発明によれば、CR時定数やキャリア輸送効果のような電氣的な制約に制

10

20

30

40

50

限されない高速の半導体発光素子が実現される。本発明をミリ波伝送用光源に適用した場合は、高価なミリ波帯の駆動回路、光変調器、シールド等が不要になり、低価格のミリ波帯変調が実現できる。また、本発明を可視半導体発光素子に適用した場合は、電圧の大きな駆動回路が不要になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】第1の実施形態に係わるDFBレーザの発光領域付近のバンド構成を示す図。

【図2】第1の実施形態に係わるDFBレーザの発光方向に沿った断面構造を示す図。

【図3】第1の実施形態に係わるDFBレーザを用いたミリ波光源の概略構成を示す図。

【図4】図3のミリ波光源における(a)点、(b)点、(c)点のスペクトルを模式的に示す図。

【図5】第1の実施形態に係わるDFBレーザを他のデバイスと集積一体化した例を示す図。

【図6】第2の実施形態に係わる青色半導体レーザの活性層近傍のバンド構成を模式に示す図。

【図7】第2の実施形態に係わる青色半導体レーザのメサに垂直な断面構造を示す図。

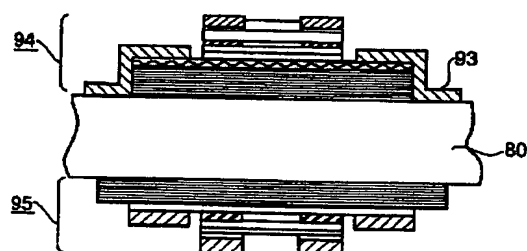
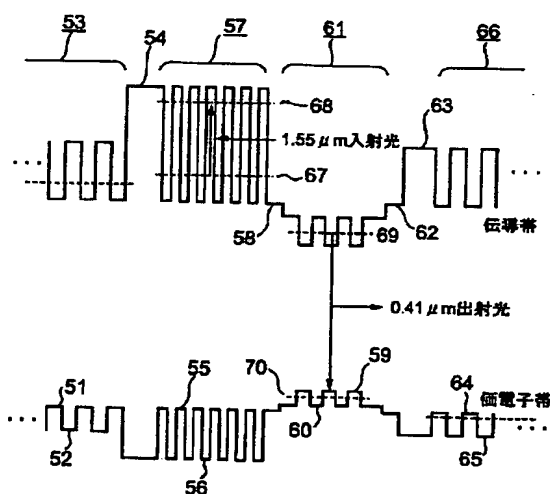
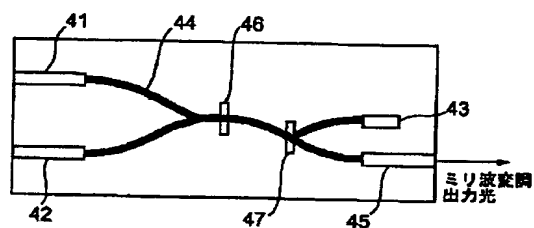
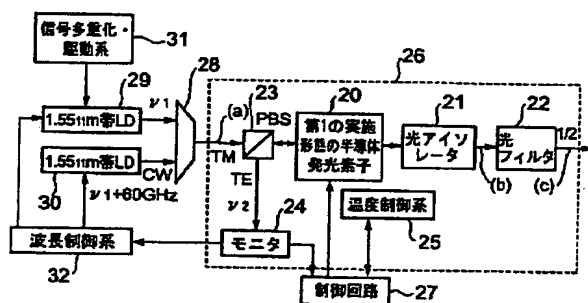
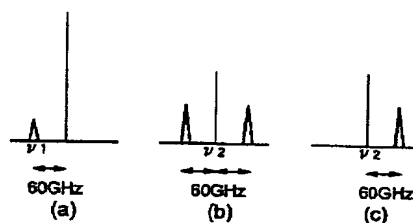
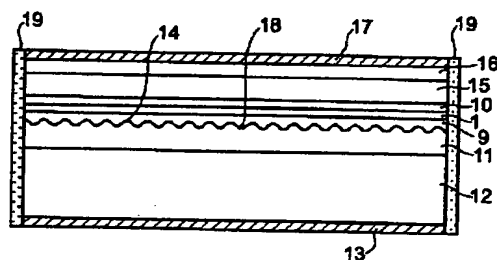
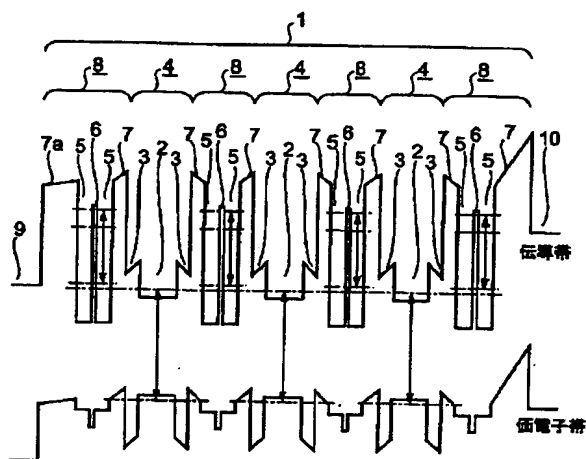
【図8】第3の実施形態に係わる赤色フォトン・リサイクリングLEDの断面構造を示す図。

【図9】第3の実施形態に係わる赤色フォトン・リサイクリングLEDを1.55 μ m帯VCSELと一体化した場合の断面構造を示す図。

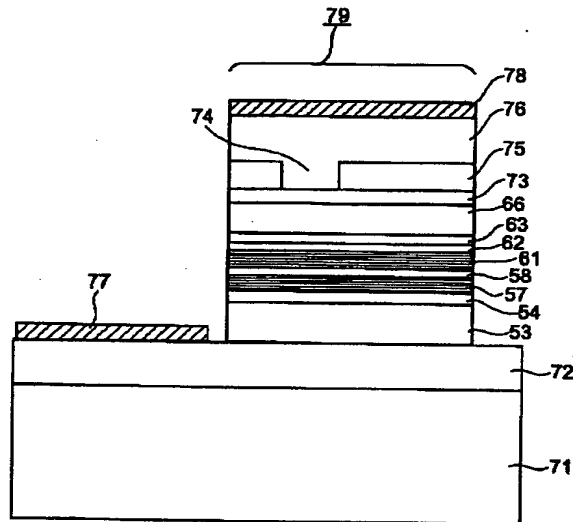
【符号の説明】

- 1…発光領域
- 2…InGaAsP井戸層(第1の半導体層)
- 3…InGaAsP障壁層
- 4…第1の量子井戸層
- 5…InGaAs井戸層(第5の半導体層)
- 6…AlAs中間障壁層
- 7, 7a, 7b…AlAsSb障壁層(第4の半導体層)
- 8…結合量子井戸(第2の量子井戸層)
- 9…n型InGaAsP光導波層(第2の半導体層)
- 10…p型InGaAsP光導波層(第3の半導体層)
- 11…n型InPクラッド層
- 12…n型InP基板
- 13, 17, 77, 78, 92, 93…電極
- 14, 83…回折格子
- 15…p型InPクラッド層
- 16…p型InGaAsPコンタクト層
- 18…位相シフト部

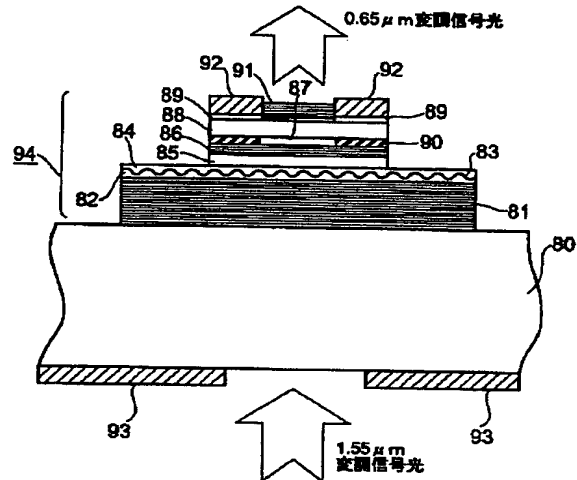
- 19…低反射率コーティング
- 20, 45…DFB半導体レーザ(実施形態の半導体発光素子)
- 21…光アイソレータ
- 22…光フィルタ
- 23…偏波ビームスプリッター
- 24, 43…モニタ受光素子
- 25…温度制御系
- 26…半導体レーザ・モジュール
- 27…制御回路
- 28…合波器
- 29, 30, 41, 42…1.55 μ m帯のDFBレーザ
- 31…信号多重化・駆動系
- 32…波長制御系
- 44…光導波路
- 46…二分の一波長板
- 47…波長フィルタ
- 51, 55, 58, 72, 75…n型GaN層
- 52, 63, 65…Al_{0.2}Ga_{0.8}N障壁層
- 53…n型超格子クラッド層
- 54, 56…Al_{0.85}Ga_{0.15}N障壁層
- 57…サブバンド間吸収量子井戸層
- 59…In_{0.18}Ga_{0.82}N層(第1の半導体層)
- 60…In_{0.05}Ga_{0.95}N層
- 61, 86…量子井戸発光層
- 62, 64, 73, 76…p型GaN
- 66…p型超格子クラッド層
- 67, 68, 69, 70…量子準位
- 71…サファイア基板
- 74…開口部
- 79…メサ
- 80…GaAs基板
- 81…n型DBR層
- 82…n型Al_{0.95}Ga_{0.05}As層
- 83…回折格子
- 84…n型Al_{0.5}Ga_{0.5}As層
- 85…n型クラッド層
- 87…p型Al_{0.95}Ga_{0.05}As層
- 88…p型クラッド層
- 89…p型GaAsコンタクト層
- 90…酸化膜
- 91…誘電体多層膜ミラー
- 94…赤色フォトン・リサイクリングLED
- 95…1.55 μ m帯VCSEL



【図7】



【図8】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 平4-136823 (J P, A)
 特開 平4-120784 (J P, A)
 特開 平2-210332 (J P, A)
 特開 平9-222619 (J P, A)
 特開 平10-90738 (J P, A)
 IEEE TRANSACTIONS
 ON MICROWAVE THEO
 RY AND TECHNIQUES,
 1997年, Vol. 45 No. 8, p.
 1416-1423
 IEICE TRANS. ELEC
 TRON. , 2002年, Vol. E85-
 C No. 1, p. 174-180

- (58)調査した分野(Int. Cl.⁷, DB名)
 G02F 1/00 - 7/00
 H01S 5/00 - 5/50